

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.01.007

聚丙烯纤维加筋和石灰改良昔格达土工程性质试验

余明东

(西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌 615013)

摘要:为探讨聚丙烯纤维加筋和石灰共同改良攀西地区昔格达土的工程性质,在昔格达土中掺入不同含量长度为 2.5 cm 的聚丙烯纤维,制备不同聚丙烯纤维掺量石灰改良土样,然后进行有荷膨胀试验、无侧限抗压试验和直接剪切试验。结果表明:聚丙烯纤维加筋不仅可减小石灰土的膨胀性,还可以改善昔格达土的抗压、抗剪和变形等力学特性;直剪试验表明,聚丙烯纤维加筋石灰土颗粒与聚丙烯纤维之间的摩擦力增大,使土样的黏聚力明显增大。结论:聚丙烯纤维加筋能有效改善石灰昔格达土的工程性质,当掺入 0.3% 的聚丙烯纤维时石灰昔格达土的聚丙烯纤维加筋效果最佳。

关键词:昔格达土;聚丙烯纤维;纤维加筋;石灰改良;工程性质

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2024)01-0049-07

Experiment on Improving the Engineering Property of Xigeda Soil with Lime and Polypropylene Fiber

YU Mingdong

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang 615013, Sichuan, China)

Abstract:To explore the methods to improve the engineering property of Xigeda soil in Panxi regions with polypropylene fiber and lime reinforcement, polypropylene fiber of different content with the length of 2.5 cm was added to the Xigeda soil to make improved soil samples. Then, loaded swelling experiment, compression experiment without lateral confinement, and direct shear experiment were conducted. The results showed that polypropylene fiber reinforcement could not only reduce the expansibility of lime soil, but also improve the mechanical traits, such as compression-resistant, shear-resistant and deformation properties of Xigeda soil. The direct shear experiment showed that the increased force of friction between the lime soil particles and polypropylene fibers significantly increased the cohesion of in soil samples. Conclusion: Polypropylene fiber reinforcement can effectively improve the engineering properties of Xigeda lime soil. When 0.3% polypropylene fiber is added, the effect of polypropylene fiber reinforcement of Xigeda lime soil can be maximized.

Keywords:Xigeda soil; polypropylene fiber; fiber reinforcement; lime improvement; engineering property

0 引言

四川省攀西地区安宁河、金沙江、大渡河、雅砻江等河谷广泛地分布着属半成岩的昔格达组地层。

由于昔格达土遇水后强度急剧衰减,易膨胀软化极易形成滑坡,因此昔格达组地层也成为国内有名的“易滑地层”。卢志鹏等^[1]研究发现,昔格达原状土的微观结构呈开放式絮凝片状,颗粒分布有一定方

收稿日期:2023-11-08

基金项目:凉山州学术和技术带头人培养资金资助项目(117281709);西昌学院“两高”人才科研支持计划项目(LGLZ202305)。

作者简介:余明东(1980—),男,四川盐源人,教授,硕士,研究方向:水利工程、基础工程,e-mail:xcxyymd@126.com。

向性,试样结构破坏后,试样的表面分形维数与荷载呈线性负相关关系。由于昔格达地层特殊的物理力学性质,导致其工程性质极差,容易产生不同程度的地质灾害,在川西南地区的建设中,昔格达地层作为不可回避的建筑工程环境引起了广泛的关注^[2]。四川省攀西地区矿产、能源、旅游及特色农业资源富集,已成为我国钒钛、稀土、水电等产业的重要基地。随着我国经济持续快速发展,将会有更多对我国国防和工业建设有影响的工程项目落户于攀西地区,高速铁路、高速公路等交通基础设施也必将大量地通过昔格达组地层分布区。因此,对昔格达土改良方法的研究尤显重要。

目前,国内外对昔格达土的改良方法主要可分为物理改良和化学改良2大类。物理方法改良主要是在昔格达土中加入竹筋等膨胀性较小的固体材料,通过改变土颗粒级配合竹筋的支撑、摩擦等作用改良土体工程性质。张世贤等^[3]研究发现,竹筋和石灰能极大地改善昔格达土的物理力学性能。郝刚立等^[4]研究发现,昔格达土填料的压实度随泥岩含量的增加而逐渐增加。已有的研究成果表明,加筋等物理改良昔格达土的方法不仅改良效果显著,而且具有绿色、环保、对环境影响小等优点。化学方法改良主要是以石灰、硅酸钠(水玻璃)溶液等为胶凝固结材料,改良昔格达遇水后易膨胀和软化等物理力学特性,其中在昔格达土中加入石灰进行改良是目前工程中使用最广泛的方法,但石灰改良效果会随改良土中钙离子的流失而降低。虞跃等^[5]对硅酸钠溶液改良昔格达土进行了稳定性计算和模拟边坡抗冲刷试验,认为硅酸钠溶液在增加边坡稳定性的同时能提高边坡的抗冲刷能力。化学改良法能有效改善昔格达土的工程特性,但却有改善效果随时间会发生流失、对环境造成污染等缺点。

目前,使用纤维作为加筋材料改良土体工程特性的研究已取得了较多的成果。黄芙蓉等^[6]研究发现,添加纤维后膨胀土受力更均匀,纤维对干缩裂隙的抑制作用明显。陈雷等^[7]通过纤维加筋与石灰共同改良膨胀土,发现纤维加筋可有效改善石灰土的膨胀性、强度等工程性质。胡小庆等^[8]对不同纤维含量及长度对纤维加筋土的强度进行了研究,发现当纤维长度为2.5 cm,掺量为0.2%时,纤维加筋效果得到最大程度地发挥。白琨等^[9]研究发现,纤维加筋作用显著增强了固化土的抗拉性能。

综上所述,纤维加筋能有效改善土的力学特性,与路基填料的使用需求具有很好的契合性。目前关于用聚丙烯纤维对昔格达土进行加筋改良的研究基本处于空白阶段。聚丙烯纤维不仅具有强度高,韧性好,亲水性差等优点,更重要的是还具有化学性质稳定,价格低廉等土工加筋材料的必备要求。因此,本文针对昔格达土存在的易膨胀软化、强度低等工程问题,采用聚丙烯纤维加筋改良和石灰改良相结合(物理改良和化学改良相结合)的方法共同处理昔格达土,研究不同纤维掺量下的石灰改良昔格达土作为路基填料的工程性质。

1 材料与方法

1.1 材料

昔格达土:取自四川省西昌市四袁公路改造工程,距西昌市四公里半入口1 500 m左右处,取土深度1~1.5 m,属高液限、中等膨胀性的昔格达土。昔格达土的物理力学性质指标如表1所示。

聚丙烯纤维:为单丝纤维,直径100 μm ,密度0.91 g/cm^3 ,抗拉强度大于560 MPa,弹性模量大于 3.8×10^3 MPa。

表1 昔格达土基本物理力学性质指标

含水率/%	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	土粒密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
28.9	1.83	2.76	52.4	26.4	26	67

1.2 方法

1.2.1 试样制备

将试验所用原状土样用橡皮锤碾碎后过 0.5 mm 筛,将过完筛后的土样放入烘箱中在 105 °C 下烘干,根据已有的石灰对土进行改良的相关研究成果表明:10% 干土重的熟石灰粉对昔格达土的改良效果最佳^[10],因此本次试样采用在昔格达素土中掺入 10% 干土重的熟石灰粉制成石灰改良昔格达土,其最优水率为 17.6%。在配制好的石灰改良土中分别按照干土重的 0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 的比例掺入长度为 2.5 cm 的聚丙烯纤维,制成不同纤维加筋率的石灰改良土试样。按照要求加入蒸馏水,调成均匀土膏,用密封袋密封进行焖料,焖料时间为 24 h。将焖好的土样取出装到试验杯中,装样时分次装入,充分压密使空气能够逸出。试验过程中使用相同的土样制备方法,按不小于 90% 的相同压实度分别制成素土、石灰改良土、纤维石灰改良土环刀样进行 7、14 和 28 d 的养护。

1.2.2 有荷膨胀、无侧限抗压验和直接剪切试验

试验以 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》为操作规程,使用膨胀仪和应变式无侧限压力

仪对重塑土、石灰改良土、纤维石灰改良土分别进行有荷膨胀试验和无侧限抗压强度试验。使用应变控制式直剪仪对最佳纤维掺量土样、一般纤维掺量土样和素土样进行直接剪切试验。有荷膨胀率试验采用分级加载进行,试样在当前竖向荷载作用下固结稳定后读数并进行下一级竖向荷载试验。无侧限抗压强度试验每分钟的轴向应变速度控制为 2%,轴向每发生 0.25% 应变需记录一次读数,控制在 20 min 内使试样发生破坏。进行固结快剪试验时,竖向应力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa,手轮转速 12 r/min。所有试验均用 2 组土样进行相互验证的平行试验。

2 结果与分析

本次试验主要从不同纤维掺量对昔格达石灰土的强度、胀缩性等方面的影响进行分析,探讨聚丙烯纤维不同掺量与石灰共同作用对昔格达土进行改良的作用和机理。

2.1 有荷膨胀试验结果

不同纤维掺量、不同龄期改良昔格达土有荷膨胀试验结果如图 1 和图 2 所示。

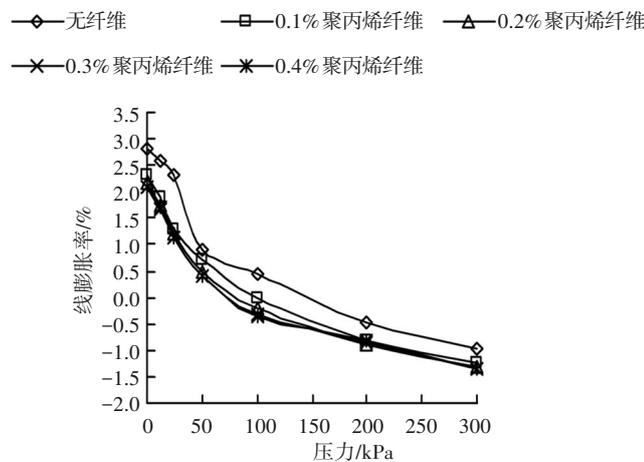


图 1 改良土线膨胀率与压力关系曲线(14 d)

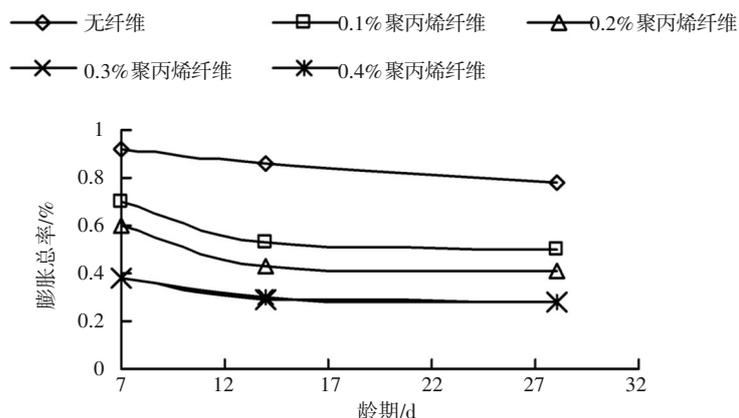


图 2 改良土膨胀总率与龄期变化关系曲线

膨胀内力是衡量黏土膨胀特性的重要指标,即图 1 中线膨胀率为 0 时曲线上所对应的压力值。由图 1 可知,纤维加筋石灰昔格达土的线膨胀率和膨胀力随纤维掺量的增加而减小。说明聚丙烯纤维对石灰昔格达土的膨胀变形具有约束作用,随着加筋纤维量的增加,土体膨胀变形过程中纤维与土颗粒接触面上产生的切应力和摩擦力的约束作用就会越加明显,这种约束作用会抑制和抵消一部分膨胀内力,膨胀内力的释放得到了减小,因此土体的膨胀率明显降低。图 1 中 0.3%、0.4% 纤维掺量的试样的试验曲线基本重合,说明纤维掺量对昔格达土膨胀性的改良作用并不是越多就越好,当纤维掺量为 0.2%~0.3% 时,纤维对昔格达土膨胀变形的约束作用最为明显;当纤维掺量超过 0.3% 时,纤维对膨胀变形的约束作用不明显。改良土 14 d 的线膨胀率与压力关系曲线随着试验压力的增加,线膨胀率由正变负之后趋于平缓,说明当试验压力超过试样膨胀力后,试样会被有效地挤密,随着试样密实程度的增加,同样压力产生的变形量减小。

由图 2 可知,改良土同龄期的膨胀总率会随纤维含量的增加显著降低,对膨胀总率改善效果最显著的最佳纤维掺量仍为 0.2%~0.3%。改良土的改良效果随龄期的增加而提高,同一种改良土养护 14 d 和 28 d 的膨胀总率十分接近,均能满足 JTGD 30—2015《公路路基设计规范》规范对路基填料膨胀总

率小于 0.7% 的要求。

2.2 无侧限抗压强度试验结果

由不同纤维掺量改良土 14 d 抗压强度与应变关系曲线图 3 可知,改良土无侧限抗压强度及极限强度均随纤维含量的增加而增加。当纤维掺量大于 0.2% 时,改良土无侧限抗压强度和极限强度显著提高,当纤维掺量超过 0.3% 时,对昔格达土的改良效果不明显。图 3 中,当纤维掺量大于 0.2% 的改良土在破坏时均具有较高的残余强度,充分表明纤维所具有的延展性和与土颗粒间的摩擦力能有效承担土体变形时所产生的拉应力,从而控制土体的继续变形。此外,当纤维掺量小于 0.1%、轴向应变达到 1.5% 时,轴向应力便开始衰减;而当纤维掺量大于 0.1%、轴向应变均在达到 2% 时,轴向应力才开始衰减,说明增加纤维的用量能延缓土样裂缝的发展,限制土体的变形。但当纤维掺量在 0.2% 以上时,土样能承受的最大轴向应变与纤维用量无关。

素土、石灰土、不同聚丙烯纤维掺量改良土不同压实度下的无侧限抗压强度值如表 2 所示。

通过对表 2 中各土样的无侧限抗压强度与压实度间进行相关性分析可知,不同土样的无侧限抗压强度均与压实度呈良好的线性正相关,即土样压实度越高其无侧限抗压强度也越高。相同压实度下,10% 石灰改良土抗压强度较素土抗压强度有显著的提高,说明石灰的凝结硬化作用改变了土体的原

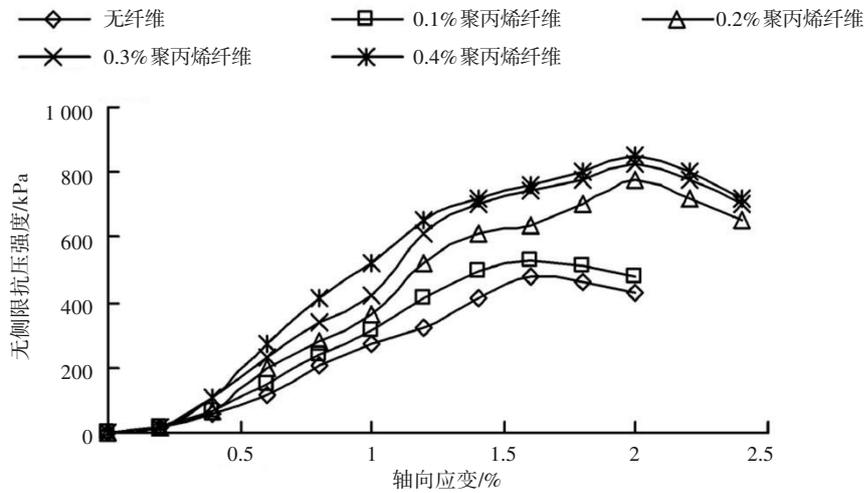


图 3 改良土抗压强度与应变关系曲线(14 d)

表 2 不同土样无侧限抗压强度值

kPa

压实度/%	素土强度	10% 石灰土强度	不同聚丙烯纤维掺量改良土强度			
			0.1%	0.2%	0.3%	0.4%
90	320.4	525.3	708.9	760.2	810.3	812.3
93	424.7	608.2	822.4	900.5	940.5	942.5
96	502.3	723.6	901.5	998.7	1 100.3	1 104.6

有结构,使土样的黏聚力得到提高故其抗压强度显著提高。纤维加筋石灰土强度均比石灰土强度有进一步提高,且随纤维加筋掺量的增加而增加,当纤维掺量为0.3%时,其强度达素土强度的2.2倍,改善效果十分显著。结合有荷膨胀试验和无侧限抗压强度试验对改良土的力学性质和变形特性进行综合分析,得出纤维加筋加石灰的综合改良方式,能显著改善昔格达土的膨胀和强度特性,其纤维的最佳纤维掺量为0.3%。

2.3 直接剪切试验结果

直剪试验对0.1%、0.3%纤维掺量的改良土试样和素土试样进行比较试验,选取不同竖向压力下的剪应力峰值为纵坐标,垂直压力为横坐标绘制试样抗剪强度包线,从而得到试样内摩擦角 φ 及黏聚力 c ,结果如图4所示。

由图4可知,素土抗剪强度小于纤维加筋石灰

昔格达土抗剪强度,并随纤维加筋量的增加而提高。3试样抗剪强度包线近似平行,说明纤维加筋对试样内摩擦角 φ 的影响不大,纤维和石灰主要使土样黏聚力显著提高,符合准黏聚力原理^[11]。当纤维掺量为0.3%时,改良土的黏聚力达到素土的2倍,纤维加筋效果显著。纤维加筋之所以能显著提高土样的黏聚力,是因为土颗粒与纤维接触面上的摩擦力远远大于土颗粒间原有的黏着力,土样被剪切时,纤维能约束土样的变形从而使土样的黏聚力显著增加,有效地提高了改良昔格达土的抗剪强度。

在室内对0.3%聚丙烯纤维掺量的改良土进行不同干湿循环次数后的承载比(california bearing ratio, CBR)和抗剪强度试验。试样经不同干湿循环次数后的承载比值试验结果如表3所示。

由表3可知,0.3%纤维加筋石灰改良昔格达土

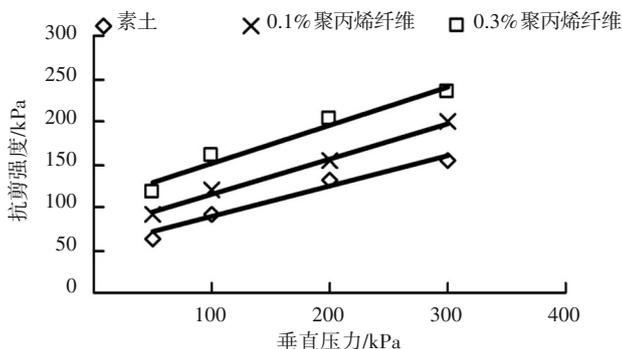


图4 土样抗剪强度与垂直压力关系

表3 改良土不同干湿循环次数后承载比值

干湿循环次数	0	1	2	3	4
CBR/%	85.3	71.6	62.4	59.7	57.2

承载比值随干湿循环次数增加而降低,第1次干湿循环后 CBR 降低 13.7%,第2次干湿循环后较第1次降低 9.2%,第3次干湿循环后较第2次降低 2.7%,第4次干湿循环后较第3次降低 2.5%,已基本稳定。土样 CBR 值虽随干湿循环次数增加而降低,虽然降低后的强度仍远大于 JTG D30—2010《公路路基设计规范》对路基填料要求值 8% 的要求,但在实际工

程中,必须重视影响昔格达土 CBR 值的重要因素含水量及泥岩含量^[12]。

0.3% 纤维掺量石灰改良土不同干湿循环次数后抗剪强度试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,改良昔格达土抗剪强度随干湿循环次数的增加而降低,说明试样在经受干湿循环时,吸水膨胀和失水收缩使土样自身结构受到较大程度的破坏,从而引起改良土黏聚力降低,但对内摩擦角的影响较小。第 3、4 次干湿循环抗剪强度包线几乎重叠,充分说明经多次干湿循环后改良土的力学性质趋于稳定状态,干湿循环次数已不再引起土样强度指标的进一步变化。

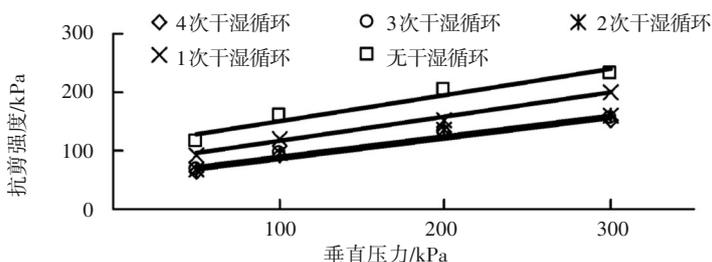


图5 改良土抗剪强度随干湿循环次数变化曲线

3 结论

石灰改良昔格达土的抗压强度、抗剪强度及应力应变关系均与纤维掺量相关。0.3% 聚丙烯纤维加筋和 10% 熟石灰相结合对昔格达土进行综合改良的方法能在有效降低膨胀力的同时提高土体的强度和力学性质稳定性。通过改变纤维掺量制

成不同试样进行室内试验,研究纤维加筋石灰昔格达土的工程性质,得出如下结论。

1) 掺入 10% 干土重的熟石灰粉,能在一定程度上提高昔格达土的抗压强度,随着纤维含量的增加,纤维对土体侧向变形的抑制作用加强,土体的膨胀变形受到约束,土体膨胀力明显降低。同时,由于土颗粒间的拉力因纤维与土颗粒间的摩擦作

用得到提高,试样的无侧限抗压强度和残余强度较之素土和石灰土得到进一步提高,并随纤维掺量的增加而提高。

2)当石灰昔格达土中掺入0.3%的纤维时,纤维对土体膨胀力的抑制作用最明显,土体抗压强度显著提升,当纤维掺量超过0.3%时,土样抗压强度不再随纤维含量增加而提高,因此石灰昔格达土中的

最佳纤维掺量为0.3%。

3)石灰昔格达土中掺入纤维,由于纤维与土颗粒间的摩擦力明显,因而土体的黏聚力显著增加,但纤维掺量对土体内摩擦角的影响甚微。经历4次干湿循环后纤维加筋石灰昔格达土的CBR值和抗剪强度指标与干湿循环次数的相关性降低,土体的力学性质趋向稳定状态。

参考文献:

- [1] 卢志鹏,孔玉侠,王慧娟,等.昔格达土的压缩特性和微观结构[J].南京工业大学学报,2022(1):114-112.
- [2] 薛新华,樊旭,蒋楚生,等.昔格达层高填方路堤沉降变形特性研究[J].铁道工程学报,2018(2):41-45.
- [3] 张世贤,黄双华,彭雄志.昔格达土加筋三七灰土物理力学性质试验研究[J].铁道建筑,2012(4):104-108.
- [4] 郝刚立,王维早.泥岩含量对昔格达土路基强度指标的影响[J].长安大学学报,2010(3):53-57.
- [5] 虞跃,陈廷方.水玻璃改良昔格达土应用前景探讨[J].路基工程,2012(2):12-14.
- [6] 黄芙蓉,方雅蓉,谭梦娟,等.聚丙烯纤维改良膨胀土干缩裂隙试验研究[J].岩土工程技术,2023(4):461-464.
- [7] 陈雷,张福海,李治朋.纤维加筋石灰改良膨胀土工程性质试验研究[J].四川大学学报,2014(6):65-69.
- [8] 胡小庆,洪柳,徐光黎,等.纤维含量及长度对纤维加筋土强度的影响研究[J].安全与环境工程,2015(2):139-143.
- [9] 白琨,李光元,许巍,等.纤维加筋固化土抗拉强度试验研究[J].公路交通科技,2023(7):28-35.
- [10] 陈伟,罗强,孙金坤,等.攀西地区昔格达土农房墙体材料改性技术研究[J].四川建筑科学研究,2010(6):201-204.
- [11] 雷胜友.现代加筋土理论与技术[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [12] 向贵府,任光明,聂德新.昔格达极软岩填料承载比特征及影响因素研究[J].路基工程,2006(5):25-27.